

ВЫБОР ИНТЕРВАЛА ДИСКРЕТИЗАЦИИ СИГНАЛА ТЕРМОДАТЧИКА В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Золотых М.О.¹, Иванов О.Ю.¹, Чесноков Ю.А.², Дмитриев А.Н.^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
проспект Мира, 19, Екатеринбург, Свердловская обл., 620002, Россия
тел.: (343) 375-44-93, e-mail: ol_iv@list.ru

² Институт металлургии Уральского отделения РАН
проспект Амундсена, 101, Екатеринбург, Свердловская обл., 620016, Россия

Аннотация — Отмечено, что интервал дискретизации температурных датчиков определяется, в первую очередь, процессом "накопление-выпуск" продуктов плавки. В силу нерегулярности этого процесса целесообразно проводить неравномерную дискретизацию сигнала. Предложен алгоритм неравномерной дискретизации, основанный на оценке мгновенной ошибки интерполяции сигнала термодатчика. Проведена обработка реальных данных доменной печи №3 комбината JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd (Китай), подтвердившая эффективность данного алгоритма.

THE DETERMINATION OPTIMUM SAMPLING INTERVAL OF THERMOCOUPLE'S SIGNAL IN CONDITION MONITORING SYSTEM OF THE BLAST FURNACE

Zolotikh M.O.¹, Ivanov O.Yu.¹, Chesnokov Yu.A.², Dmitriev A.N.^{1,2}

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
pr. Mira, 19, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, 620002, Russian Federation
ph.: 375-44-93, e-mail: ol_iv@list.ru

² Institute of Metallurgy of Ural Branch of Russian Academy of Sciences
pr. Amundsena, 101, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, 620016, Russian Federation

Abstract — It is noted, that the sampling interval of the temperature sensors is determined by a process of "accumulation-output melting products. Because of the irregularity of this process, it is advisable to uneven sampling of the signal. An algorithm for non-uniform sampling based on the estimation of the instantaneous errors of the prediction signal of the temperature sensor is offered. Carried out processing real data of blast furnace No. 3 plant of JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd (China) has confirmed the effectiveness of this algorithm

I. Введение

Наиболее перспективными являются методы мониторинга состояния футеровки горна доменной печи, основанные на измерениях температуры при помощи термодатчиков, которые расположены в огнеупорной кладке. Система мониторинга состояния доменной печи, построенная по такому принципу [1-4], позволяет своевременно информировать обслуживающий персонал о всех процессах, происходящих внутри печи, что способствует своевременному проведению всех профилактических работ, а, следовательно, увеличению жизненного цикла печи.

Система мониторинга состояния доменной печи содержит следующие основные элементы:

- температурные датчики (в кладке или в трубах системы охлаждения);
- программируемые логические контроллеры (ПЛК);
- OPC сервер;
- сервер СУБД;
- коммутаторы локальной сети предприятия (цеха);
- автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора.

Взаимодействие элементов системы изображено на рисунке 1.

Чаще всего роль температурных датчиков выполняют термопары [4, 5]. Применение термопар для установки в кладку обусловлено широким рабочим диапазоном (для различных типов от -270 до 2500 °С), удовлетворительной точностью

измерений, низкой ценой, взаимозаменяемостью и высокой надёжностью.

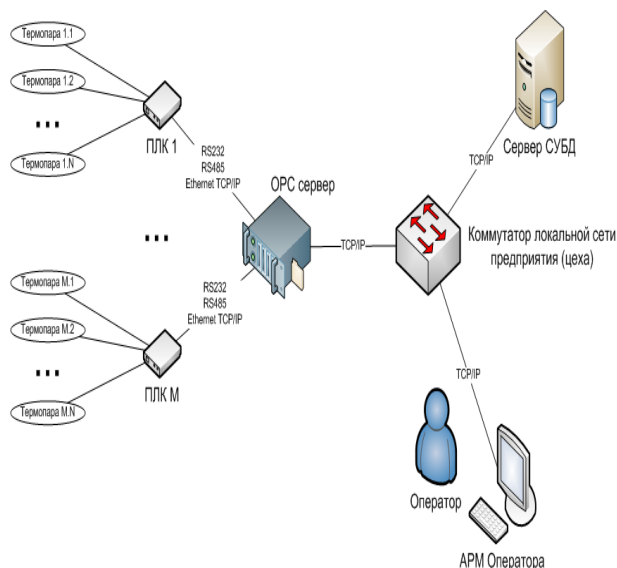


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга доменной печи

Для каждого датчика в СУБД записывается измеренное значение и время этого измерения. С учётом того, что количество датчиков в печи составляет от 500 до 1000 (в зависимости от её объёма) [1, 3, 4], а время хранения – до 20 лет, объём обрабатываемых данных может быть весьма значительным. Поэтому особую роль играет правильный выбор интервала дискретизации

(времени между записями в базу измеренных значений).

II. Основная часть

Доменный процесс, вследствие значительного времени пребывания шихтовых материалов в печи, характеризуется очень медленным изменением температурного режима. Эти изменения носят циклический характер из-за процессов накопления и выпуска жидких продуктов плавки и соответствующих им изменений условий восстановительной работы горновых газов в шахте и тепловой работы в горне [6]. Сигнал температурного датчика характеризует термодинамические процессы, происходящие внутри металлургического агрегата. В таком сигнале можно выделить три составляющих:

1. Медленное изменение температуры огнеупоров, связанное с изменением режима работы металлургического агрегата (задувка печи, нормальная эксплуатация, переход на тихий ход, разогрев и т.д.). Длительность каждого режима работы может составлять от нескольких месяцев, до нескольких лет. Далее будем называть такие процессы «медленными».
2. Периодическое изменение температуры, и связанное с циклом «накопление-выпуск» продуктов плавки. Интервал между максимумами температурных значений варьируется от 30 минут до нескольких часов (в зависимости от технологического процесса) [6]. Далее будем называть такие процессы «быстрыми».
3. Сигнал помехи, обусловленный особенностями технологии измерения температуры при помощи термопар [4] (действие электромагнитных помех на измерительное устройство и соединительные кабели, шумы квантования и др.). Такой сигнал можно считать широкополосным со спектром близким к равномерному [7], и при выборе интервала дискретизации его можно не учитывать.

На рисунке 2 представлена спектральная плотность реального сигнала, полученного от термопары, расположенной в центре лещади (равноудаленной от лётки), максимально близко к области высоких температур. Запись значений производилась на доменной печи №3 комбината JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd, объемом 1750 м³. Для удобства отображения спектр пронормирован к максимальной амплитуде.

Как видно из рисунка 2 в спектре явно выражены составляющие медленных (менее 0.1 мГц) и быстрых (0.1 – 0.6 мГц) температурных процессов.

Оценим объем информации, который необходимо хранить и обрабатывать для восстановления сигналов от температурных датчиков. Примем усредненные параметры: длительность кампании печи 20 лет, а количество датчиков – 700. Если записывать показания датчиков ежесуточно, то для хранения данных потребуется 5,11 млн. записей в базе данных. Если фиксировать показания ежеминутно, то для этого потребуется уже более 7,3 млрд. записей. Разброс количества записей, от которого зависит организация работы СУБД и ее быстродействие, весьма значителен. В то же время, в первом случае невозможно будет восстановить быстрые процессы в горне, так как

длительность циклов «накопление-выпуск» намного меньше интервала дискретизации. Во втором случае восстановление быстрых процессов возможно. Поэтому вопрос о выборе интервала дискретизации сигнала от температурного датчика в системе мониторинга состояния доменной печи является весьма сложным и неоднозначным.

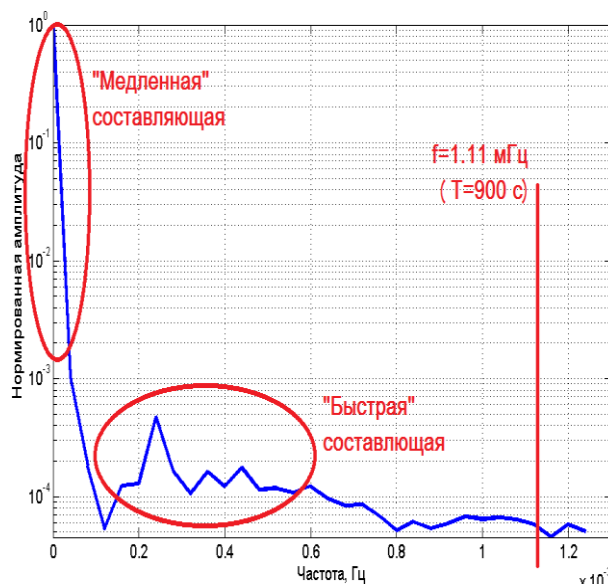


Рис. 2. Амплитудный спектр реального сигнала

Процесс восстановления исходного аналогового сигнала в произвольный момент времени по его цифровым отсчетам называется интерполяцией. В работах Котельникова предлагается использование базиса Фурье и интерполяционной функции вида:

$$S(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S(nT) \frac{\sin \frac{\pi(x-nT)}{T}}{\pi \frac{x-nT}{T}}, \quad (1)$$

где T – интервал дискретизации и $S(n \cdot T)$ – дискретный отсчет функции под номером n . Однако такая функция редко используется в современных системах обработки сигналов, так как для получения результатов интерполяции требуется большое количество математических операций (количество слагаемых определяется требованиями точности). На практике наиболее часто используют линейную и ступенчатую интерполяционные функции, которые значительно эффективнее по вычислительным затратам [7].

Практические исследования влияния интервала дискретизации на объем базы данных и точность передачи информации о нагреве кладки производились на доменной печи №3 комбината JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd. Результаты представлены в таблице 1.

Для анализа были взяты показания температурных датчиков, полученные системой мониторинга в июле 2014 года. Показания с датчиков снимались через 15 секунд, то есть через интервал, который обеспечивается аппаратными возможностями системы. Данный интервал дискретизации позволяет с высокой точностью восстановить все изменения температуры в процессе эксперимента. Далее эта выборка использовалась в качестве эталонной при оценке точности восстановления температурных процессов.

Оценка точности производилась по средне-квадратичной погрешности

$$\sigma = \frac{1}{518} \sum_{k=1}^{518} \sqrt{\sum_{i=1}^{178560} (t_{k3}(i) - t_k(i))^2}, \quad (2)$$

где t_{k3} – эталонная последовательность, которая получается программируемого логического контроллера ПЛК, t_k – исследуемая интерполированная последовательность, k – порядковый номер температурного датчика в печи и i – номер отсчёта.

Таблица 1
Сравнительная характеристика алгоритмов интерполяции

Интервал дискретизации	К-во отсчетов, шт.	Объем БД, КБ	Среднеквадратическая погрешность, град.	
			Ступенчатая интерполяция	Линейная интерполяция
15 с	178560	371404	-	-
1 мин.	44640	92851	0.003	0.00004
5 мин.	8928	18570	0.01	0.0011
10 мин.	4464	9285	0.03	0.0045
15 мин.	2976	6190	0.04	0.0098
30 мин.	1488	3095	0.09	0.03
1 час	744	1547	0.17	0.11
6 часов	124	257	0.70	0.52
12 часов	62	129	1.06	0.77
24 часа	31	64	1.72	1.17

В соответствии с теоремой Котельникова сигнал $x(t)$, имеющий спектр, ограниченный частотой F_B , может быть полностью и однозначно восстановлен по его дискретным отсчетам, взятыми с частотой $F_d > 2F_B$ [10]. В данном случае минимальной частотой дискретизации можно считать частоту 1.11 МГц, что соответствует интервалу 900 секунд.

Однако частота процессов, связанных с накоплением и выпуском продуктов плавки, зависит от множества факторов [6] и может меняться в значительных пределах. Именно на это указывает достаточно широкий спектр «быстрой» составляющей сигнала от температурного датчика (см. рисунок 2).

А это, в свою очередь, создает предпосылки для дальнейшего сокращения объема БД показаний температурных датчиков за счет использования неравномерной дискретизации сигнала. Применение данного метода требует некоторых дополнительных знаний о текущем поведении дискретизируемого сигнала. Эти знания можно получить путем вычисления мгновенного спектра сигнала или оценки ошибку (мгновенную, интегральную) его интерполяции.

Техническая возможность проведения таких действий в системе мониторинга состояния доменной печи существует. Ее обеспечивают, во-первых, возможность современных ПЛК по взятию отсчетов, которая многократно превышает потребности дискретизации сигнала от температурных датчиков, во-вторых, быстроедействие современных компьютеров, которое позволяет в реальном масштабе времени производить необходимую дополнительную обработку.

В работе предлагается использовать следующий алгоритм дискретизации сигнала температурного датчика (см. рисунок 3). На предварительном этапе производится считывание показаний сигнала от температурного датчика с частотой, которую

обеспечивает программируемый логический контроллер ПЛК (десятки раз в секунду). Далее производится усреднение полученных значений на интервале 1 минута. Эта операция позволяет существенно ослабить влияние случайной составляющей в виде сигнала помехи на обрабатываемые данные [7].



Рис. 3. Блок-схема алгоритма неравномерной дискретизации

После этого производится вычисление погрешности между реальным сигналом и интерполируемым и ее сравнение с пороговым значением согласно выражению:

$$\delta = \sum_{n=1}^i ((T_1 + (t_n - t_1) \frac{T_i - T_1}{t_i - t_1}) - T_n)^2, \quad (3)$$

где T – значения температуры, t – значения времени, i – размер массива накопленных значений.

Процесс продолжается до тех пор, пока погрешность не превысит порог. После этого значения температуры и времени заносятся в БД, производится сброс счетчика и процесс повторяется.

Возможна ситуация, когда измеряемые значения температуры в течении длительного времени изменяются по линейному закону. При восстановлении сигнала необходимо отличать такие ситуации от ситуаций, когда модуль сбора данных по каким-либо причинам оказался неработоспособен. Для решения этой задачи вводится максимальное время накопления данных $t_{max} = t - t_0$, по достижении которого информация будет внесена в БД вне зависимости от значения накопленной погрешности.

Адаптивный алгоритм позволяет путём задания максимальной величины потерь минимизировать количество отсчётов времени на тех участках, где характер изменения функции температуры близок к линейному и величина потерь небольшая.

Для предложенного алгоритма было проведено исследование его эффективности на ранее исследованном наборе данных. При этом были использованы следующие пороговые значения: накопленная погрешность — 1 °C, максимальное время накопления данных — 4 часа. При указанных параметрах из 178 560 отсчётов эталонной последовательности было получены 1696 отсчётов неравномерной дискретизации. Внешний вид полученной функции приведён на рисунке 4.

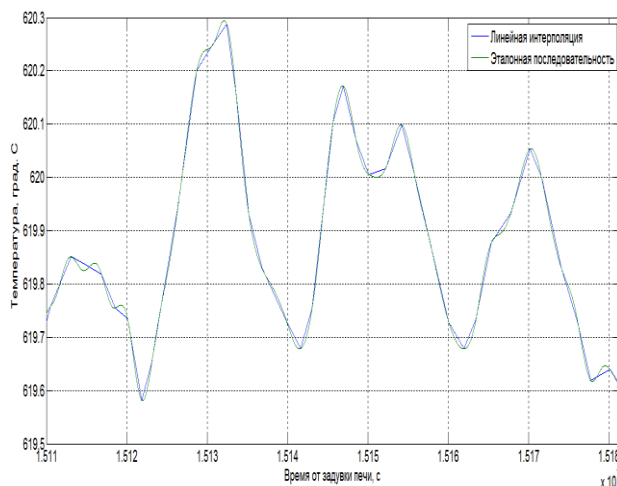


Рис. 4. Линейная интерполяция сигнала при неравномерной дискретизации

Как видно из рисунка, частота дискретизации значительно уменьшается на тех участках, где сигнал носит линейный характер и возрастает, в зонах локальных экстремумов. Это позволяет более точно сохранять информацию о локальных экстремумах сигнала, которые связаны с моментами начала и окончания выпуска металла, а также о величине перепада температур между этими моментами.

В ходе эксперимента полученное среднее значение интервала дискретизации составило 1580 с (26 мин.). Среднеквадратическая погрешность составила 0.0093, что чуть лучше, чем погрешность для линейной интерполяции последовательности с равномерным шагом дискретизации 900 с (см. таблицу 1).

III. Заключение

Построение спектра реального сигнала от термопары, входящей в систему мониторинга состояния доменной печи, позволило обосновать выбор интервала дискретизации сигнала. Пятнадцать минут, в случае равномерной дискретизации сигнала, позволяют с достаточной степенью точности восстановить все нюансы процесса «накопление – выпуск» продуктов плавки.

Предложенный алгоритм неравномерной дискретизации, основанный на оценке ошибки интерполяции сигнала, позволил существенно сократить объем БД температурных показателей, за счет увеличения среднего интервала дискретизации. Апробация алгоритма на реальных данных, полученных с доменной печи №3 комбината JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd (Китай), показала, что средний интервал дискретизации можно увеличить

до двадцати шести минут без потерь в качестве восстановления сигнала.

IV. Литература

- [1] Dmitriev A.N., Chesnokov Y.A., Chen K., Ivanov O.Y., Zolotykh M.O. Monitoring the Wear of the Refractory Lining in the Blast-Furnace Hearth. Steel in Translation, 2013. No 11. pp. 8–14.

Кудинов Г.А., Кришталь В.А., Лысенко Е.Е. Компьютерная диагностика разгара огнеупорной кладки горна и лещади доменных печей // Сталь. 1997. №10. с.10–12

Dmitriev A.N., Zolotykh M.O., Chesnokov Y.A., Vitkina G.Y., Ivanov O.Y., Chen K. New monitoring system of the refractory lining wear in the blast furnace hearth. Applied Mechanics and Materials, 2014. Vol. 670-671. pp. 1274–1284.

Dmitriev A.N., Zolotykh M.O., Chesnokov Y.A., Ivanov O.Yu., Vitkina G.Yu. The determination of thermocouples optimum number in the blast furnace hearth for control of its condition. Applied Mechanics and Materials, 2015. Vol. 741. pp. 302.

Hong-bo Zhao, Shu-sen Cheng Optimization for the structure of BF hearth bottom and arrangement of thermal couples. Journal of University of Science and Technology, 2006. No 6. pp. 497–503.

Макиенко В.Г., Думбур Р.С., Русских В.П., Васильевич М.Я., Косолап Н.В. Автоматическая система диагностики тепломассообменных процессов в металлоприемнике и регулирования теплового режима горна с учётом циклов "накопление - выпуск" жидких продуктов плавки в доменной печи. Доменное производство - XXI век. Труды Международного конгресса. М. 2010. с. 498–502.

Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. // М.: Додэка XXI, 2008. С. 720.